



УДК 621.438

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

ESTIMATED UNCERTAINTY OF MEASUREMENT PARAMETERS GAS TURBINE PLANT OPERATION

Якименко Иван Сергеевич, магистрант каф. «Турбины и двигатели» Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: Ivan.lakimenko@at.urfu.ru.

Блинов Виталий Леонидович, канд. тех. наук. старший преподаватель каф. «Турбины и двигатели» Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: vithomukyn@mail.ru.

Комаров Олег Вячеславович, канд. тех. наук. доцент каф. «Турбины и двигатели» Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: ov_komarov@mail.ru.

Yakimenko Ivan Sergeyevich, Student, Department «Turbines and Engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: Ivan.lakimenko@at.urfu.ru.

Blinov Vitaly Leonidovich, Candidate Sc., Senior Lecturer, Department «Turbines and Engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vithomukyn@mail.ru.

Komarov Oleg Vyacheslavovich, Candidate Sc., Docent, Department «Turbines and Engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ov_komarov@mail.ru.

Аннотация: В настоящей работе проводится оценка неопределенности измерений для двух различных методик определения эффективной мощности и коэффициента технического состояния газотурбинной установки.

Abstract: In the present paper we estimate the measurement uncertainty for two different methods for determining the shaft power and the technical position of the gas turbine plant.

Ключевые слова: газотурбинные установки; газоперекачивающие агрегаты; техническое состояние; эффективная мощность.

Key words: gas turbine plants; gas pumping units; technical condition; effective power.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач газотранспортных предприятий является снижение издержек на транспорт газа. Выполнение этой задачи должно реализовываться при использовании мониторинга технического состояния (ТС) эксплуатируемого оборудования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе определена эффективная мощность и коэффициент технического состояния (КТС) газотурбинной установки (ГТУ), на примере двигателя НК-16СТ, различными методами [2-4]. Принципиальная схема ГТУ типа НК-16СТ представлена на рис.1. Для проведения расчета известны параметры работы газоперекачивающего агрегата (ГПА) по результатам натурных испытаний.

В настоящей работе акцент сделан на сравнении двух методик определения эффективной мощности ГТУ: через параметры ЦБК [3] и СТ [4]. Первый подход основан на определении мощности, потребляемой центробежным газовым компрессором (ЦБК) природного газа [3]. Такой метод нашел наибольшее распространение, но имеет ряд недостатков [2]. Для проведения расчетов в данном случае по результатам натурных испытаний необходимо знать следующие параметры работы: расход топливного газа ($G_{\text{т}}$), давление на входе выходе ЦБК ($P_{1\text{н}}, 2\text{н}$), температуру на входе и выходе ЦБК ($T_{1\text{н}}, 2\text{н}$), расход технологического газа через ЦБК ($G_{\text{н}}$), которые выделены полужирным (рис.1, а). Второй подход основан на методе определения эффективной мощности ГТУ по термодинамическим параметрам [4]. В описанной работе мощность СТ определяется по теплотерпаду и расходу рабочего тела. В данном

случае для расчета расхода рабочего тела применяются газодинамические функции [5]. Особенностью данного подхода является использование штатных измерений параметров работы ГТУ, которые выделены полужирным (рис.1, б), таких как: атмосферное давление (P_0), температура на входе в осевой компрессор (ОК, T_0), давление за ОК (P_1), температура перед силовой турбиной (СТ, T_3). Существуют методики использующие и другие зависимости (подходы) расчета эффективной мощности и КПД, например, для ГТК-10-4 [6].

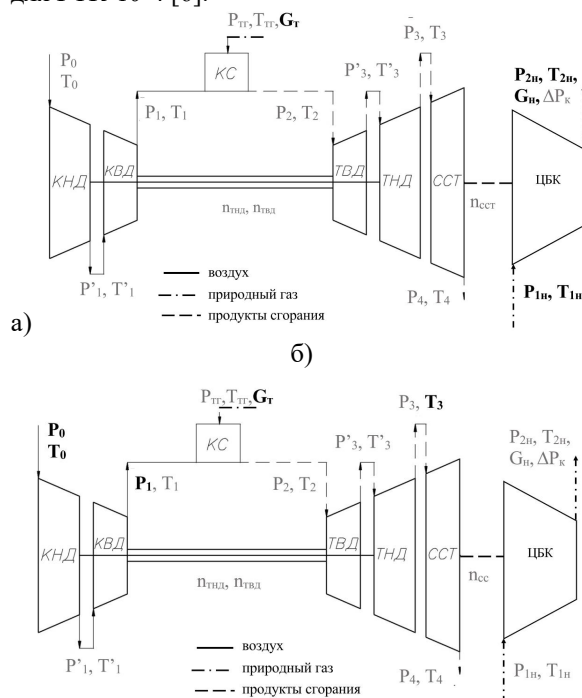


Рис. 1. Тепловая схема НК-16СТ с выделенными параметрами для методики расчета мощности через ЦБК (а) и СТ (б): КНД – компрессор низкого давления; КВД – компрессор высокого давления; КС – камера сгорания; ТВД – турбина высокого давления; ТНД – турбина низкого давления; ССТ – свободная силовая турбина; ЦБК – центробежный компрессор

В общем случае, ни одно измерение или испытание не являются совершенными, поэтому, вне зависимости от способов и аппаратуры измерения все процессы измерения заключают в себе изъяны, которые ведут к погрешности результатов. По причине недостатка в точном знании значения измеряемой величины, результат может трактоваться только как приближение к значению или оценка значения. Поэтому результат измерения только тогда считается окончательным, когда к нему прилагается значение его неопределенности [7].

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Исходя из выше сказанного, важную роль играет оценка неопределенности измерений параметров

необходимых для определения эффективной мощности. На первом этапе работы в соответствии с [7] произведена оценка неопределенности измерений соответствующих входных данных по двум сравниваемым подходам к определению мощности ГТУ. Традиционно неопределенность результата измерения оценивалась как имеющая две составляющие погрешности: случайную погрешность, которая предположительно возникает по причине непредсказуемых случайных временных и пространственных изменений случайной величины, и систематическую погрешность, принимаемую для повторяющихся наблюдений. Существуют следующие группы составляющих неопределенности:

А - составляющие, которые оценивают с помощью статистического анализа серии наблюдений "неопределенность, оцененная по типу А";

$$u_A(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n_i(n_i-1)} \sum_{q=1}^n (x_{iq} - \bar{x}_i)^2} \quad (1)$$

где x_{iq} - единичный результат наблюдения (измерения) переменной входной величины;

\bar{x}_i - среднеарифметическое значение переменной входной величины по n наблюдениям;

n - число наблюдений (измерений);

$u_A(x_i)$ - опытное среднеквадратическое отклонение среднеарифметического значения.

В - составляющие, которые оценивают с помощью методов, отличных от статистического анализа "неопределенность, оцененная по типу В".

$$u_B(x_i) = \frac{b_{i+} - b_{i-}}{k\sqrt{3}} \quad (2)$$

b_{i+}, b_{i-} - верхняя и нижняя граница для i -й входной величины;

k - коэффициент охвата;

$u_B(x_i)$ - стандартная неопределенность по типу В.

В случае, когда отсутствует необходимая информация о коэффициенте охвата, допускается предположить нормальное распределение возможных значений измеряемой величины для вычисления неопределенности результатов измерений, соответствующей доверительной вероятности $p = 95\%$, при коэффициенте охвата $k = 2$ [7].

Суммарной стандартной неопределенности, объединяет обе группы неопределенностей (А и В). Ее оценка может производиться по следующей формуле:

$$u_C = \sqrt{u_A(x_i)^2 + u_B(x_i)^2} \quad (3)$$

В ходе данной оценки были найдены неопределенности измерений типа А и В, а также их суммарное значение. Для примера представлены значения неопределенности типа А и В по методике определения эффективной

мощности через параметры ЦБК (таблицах 1 - 2). В таблице 3 представлены значения суммарной неопределенности по двум методикам.

Таблица 1.
Неопределенность измерений типа А

Метод	Обознач.	Размер.	Режимы работы		
			1	2	3
1	2	3	4	5	6
$P'_{1н}$	u_a	$\pm \%$	0,26	0,18	0,28
$T_{1н}$			0,21	0,05	0,12
$P'_{2н}$			0,21	0,21	0,21
$T_{2н}$			0,20	0,05	0,11
G_n			0,74	0,53	1,24
$G_{гг}$			0,45	0,55	0,13

Таблица 2.
Неопределенность измерений типа В

Метод	Обознач.	Размер.	Режимы
1	2	3	4
$P'_{1н}$	$\pm u_B$	%	0,087
$P'_{2н}$		%	0,087
G_n		%	1,732
$G_{гг}$		%	0,289
$T_{1н}$		К	0,116
$T_{2н}$		К	0,116

Таблица 3.
Суммарная неопределенность измерений

Метод	Обознач.	Размер.	Режимы работы		
			1	2	3
1	2	3	4	5	6
ЦБН	$\pm u_C$	%	2,00	1,90	2,22
СТ		%	0,49	0,52	0,63

Сравнение неопределенностей по двум методам представлено на (рис.2, а, б).

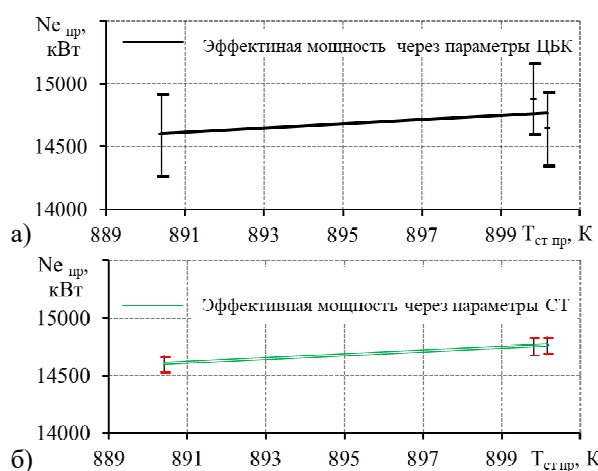


Рис. 2. Оценка неопределенности методов расчета эффективной мощности ГТУ через параметры ЦБК (а) и СТ (б)

Согласно полученным результатам в настоящем исследовании метод определения эффективной мощности по параметрам ЦБН по сравнению с методом по параметрам СТ имеет меньшие значения неопределённости. Однако, для

уточнения полученных результатов требуется проведение дополнительного анализа большего числа режимов испытаний различных типов ГПА. Определена величина располагаемой мощности и КТС по рассматриваемым методам. Величина располагаемой мощности метода по параметрам ЦБК составила 14309,2 кВт, КТС 0,8943. Располагаемая мощность по методу, который использует параметры СТ в данном случае оказалась близкой к значению метода по параметрам ЦБК и составила 14316,8 кВт, КТС 0,8948.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе произведено определение эффективной мощности и коэффициента технического состояния по двум методикам, а также выполнена оценка неопределенности измерений этих методик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Б.С. Ревзин Газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом. Екатеринбург. УГТУ-УПИ, 2002. С. 265.
2. Якименко И.С., Блинов В.Л., Комаров О.В. Оценка технического состояния газотурбинных установок по мощности. Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Екатеринбург, 2016. С.316-319.
3. Шуровский В.А. к.т.н., Сеницын Ю.Н. к.т.н., Корнеев В.И., Черемин А.В., Степанов Г.С. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов ПР 51-31323949-43-99. Москва. ВНИИГАЗ, 1999. С. 26.
4. Oleg V. Komarov, Viacheslav A. Sedunin, Vitaly L. Blinov, Alexander V. Skorochodov. Parametrical diagnostics of gas turbine performance on side at gas pumping plants based on standard measurements // ASME Turbo Expo, Dusseldorf, Germany, 16-20 June 2014. – P.1-8.
5. А.А. Диментова, Ф.С. Рекстин, В.А. Рябов Таблицы газодинамических функций. Москва. Машиностроение, 1966. С. 73.
6. Ю.Д. Земенков Эксплуатация магистральных газопроводов: учебное пособие. Тюмень. ТюмГНГУ, 2002. С. 525.
7. ГОСТ Р 52782-2007 – Установки газотурбинные. Методы испытаний. Приемочные испытания.
8. ГОСТ Р 8.736-2011 ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.